

УДК 621.923

Р.М. Стрельчук, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗЕРЕН МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

*Запропоновано методику моделювання формуючого при шліфуванні алмазним кругом напружено-деформованого стану в твердосплавній пластині з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфраму. Показано, що з підвищенням продуктивності шліфування в об'ємі пластини з твердого сплаву «ВолКар» на глибині більше одного мікрметра під оброблюваної поверхнею можуть утворюватися пошкодження. Результати численних досліджень корелюють з експериментальними даними, отриманими раніше для комбінованої обробки.*

*Ключові слова: шліфування, алмазний круг, напружено-деформований стан, монокарбід вольфраму*

*Предложена методика моделирования формирующегося при шлифовании алмазным кругом напряженно-деформованного состояния в твердосплавной пластине из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама. Показано, что с повышением производительности шлифования в объеме пластины из твердого сплава «ВолКар» на глубине более одного микрометра под обрабатываемой поверхностью могут образовываться повреждения. Результаты численных исследований коррелируют с экспериментальными данными, полученными ранее для комбинированной обработки.*

*Ключевые слова: шлифование, алмазный круг, напряженно-деформованное состояние, монокарбид вольфрама*

*The technique of forming simulation for grinding diamond wheel of the stress-strain state in the tungsten carbide plate of nanosized tungsten grains monocarbide. It is shown that with the increase in the volume performance grinding of carbide plates "WolKar" at a depth of more than one micrometer for the treated surface can be formed of damage. The results of numerical studies correlate with the experimental data obtained earlier for the combined processing.*

*Keywords: grinding, diamond wheel, stress-strain state, tungsten grains monocarbide*

### **Введение**

При затачивании режущего инструмента большое значение имеет качество формирующейся режущей кромки, а также обеспечение минимальной поврежденности материала инструмента в ее близи [1-4]. Существенным фактором, влияющим на износостойкость инструмента, является уровень остаточных напряжений в приповерхностных слоях режущей кромки [5-7]. Качественно сформированные геометрические параметры и шероховатость поверхности на лезвии инструмента оказывают значительное влияние на процесс резания, износ режущего инструмента во время работы и качество обработанных поверхностей изделий.

Проблема затачивания инструмента из современных композиционных материалов приобрела особую актуальность в связи с расширяющимся

применением для изготовления инструмента материалов высокой твердости с квазихрупким и хрупким характером разрушения.

В данной работе методом численного моделирования исследуется процесс формирования повреждений вблизи поверхности шлифования режущей кромки и его влияние на напряженно-деформированное состояние в пластине режущего инструмента при его затачивании.

### **Состояние вопроса и постановка задачи**

Современные режущие инструменты для обработки конструкционных материалов имеют трехмерную геометрическую конфигурацию. В проведенных ранее исследованиях [2-4] было показано, что разрушение материала режущих элементов при затачивании, как правило, происходит вдоль режущей кромки на расстояниях, не превышающих 0,25-0,3 мкм. Для моделирования процесса затачивания твердосплавных режущих инструментов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама рассмотрим схему обработки и действующие при этом динамические составляющие процесса (рис. 1).

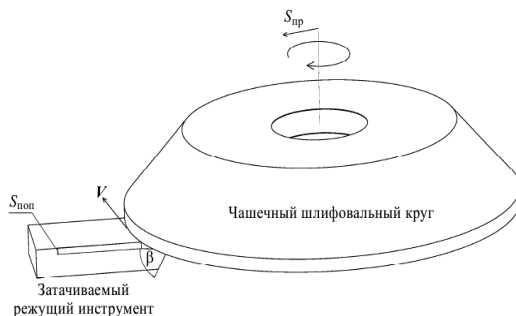


Рисунок 1 – Схема затачивания режущего инструмента

Затачиваемый режущий элемент, имеющий форму клина с углом заострения  $\beta$ , закреплен неподвижно в специальном крепежном приспособлении. Шлифовальный круг (в данном случае чашечный конический) вращается вокруг своей оси и обеспечивает постоянную линейную скорость  $V$  (м/с) в зоне шлифования.

Кроме того, шлифовальный круг поступательно движется в сторону затачиваемого режущего элемента с постоянной скоростью, равной величине продольной подачи  $S_{пр}$  (м/мин). В процессе затачивания с поверхности режущего элемента снимается слой материала, равный величине поперечной подачи  $S_{поп}$  (мкм/дв. ход).

В результате воздействия абразивного инструмента на обрабатываемую заготовку в зоне резания возникают усилия, которые могут быть измерены в

натурных экспериментах с высокой точностью [2]. Данные об усилиях при алмазном шлифовании твердого сплава «ВолКар» могут быть использованы для определения напряженно-деформированного состояния в рассматриваемых элементах режущего инструмента. Линейные скорости смещения поверхностного слоя материала непосредственно в месте контакта затачиваемого режущего элемента с шлифовальным кругом зависят от радиальных размеров круга. Производительность шлифования существенно зависит от рабочего диаметра круга и скорости сдвига в месте обработки.

Материал режущего элемента будем считать однородным, сплошным и изотропным. Его разрушение носит квазихрупкий характер и связано с накоплением повреждений структуры материала при относительно небольших неупругих деформациях. Технологические силы, действующие на режущий элемент со стороны абразивного инструмента, распределены равномерно по передней поверхности вдоль режущей кромки затачиваемого инструмента. Режущая кромка является абсолютно острой (радиус закругления равен нулю), и внешние силы распределены равномерно по ширине резца, а тыльная поверхность не нагружена. Выберем в качестве объекта исследования клинообразную твердосплавную пластину из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама определенной ширины и длины с углом при вершине, варьирующимся в пределах  $\beta = 50\text{--}60^\circ$ . Форма и условные размеры модели обрабатываемой пластины представлены на рис. 2.

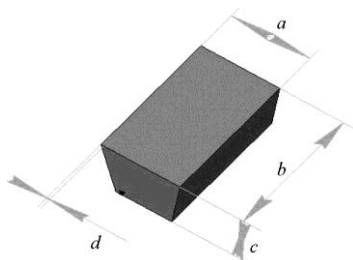


Рисунок 2 – Условные размеры обрабатываемой пластины

Длина пластины  $b$  может варьироваться в пределах от 3 до 21 мм в зависимости от назначения режущего элемента. Ширина пластины  $a$  зависит от конструктивных особенностей режущей части инструмента и определяет ресурс и эксплуатационные характеристики инструмента. Наибольший интерес при формировании режущего элемента инструмента представляет небольшой участок поверхности где, как правило, происходит интенсивный контакт стружки с передней поверхностью инструмента в процессе резания материалов. К этому участку поверхности предъявляются повышенные требования по качеству обработки при подготовке инструмента. Ширина

этого участка  $d$  от режущей кромки в глубь по поверхности достигает 1 мм. Толщина пластины  $s$  изменяется в пределах от 3 до 12 мм и влияет на ресурс инструмента и предельные нагрузки.

### **Материалы исследований**

Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из сплава высокой твердости была использована вычислительная модель, разработанная в рамках методов механики повреждаемых сред. В 3D-постановке моделировались процессы деформации и повреждения объемной области, показанной на рис. 2, со следующими размерами:  $c = 3$  мм,  $a = 21$  мм,  $b = 12$  мм,  $\beta = 50^\circ$ .

Физико-математическая модель механического поведения повреждаемой среды включала уравнения сохранения массы, импульса и энергии, записанные в рамках лагранжевого подхода континуальной механики. Для описания кинетического процесса развития повреждений в исследованном материале «ВолКар» использована модифицированная модель [8, 9].

Для решения использовался решатель программного комплекса AUTODYN TM / ANSYS Workbench-13, реализующий конечно-разностную схему Рихтмайера.

Выбор шага пространственной дискретизации расчетной области обеспечивал сходимость численного решения задачи. Шаг интегрирования по времени определялся из условия Куранта [9].

### **Результаты моделирования и их обсуждение**

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния и изменения параметра поврежденности в зоне шлифования показаны на рис. 3 - 5. На рис. 3, а и б показаны изменения расчетных значений давления в точках 1, 2, 3 от времени и формирующееся квазистационарное поле давлений в обрабатываемой пластине при скорости сдвига  $V = 33$  м/с, температуре  $430^\circ\text{C}$  и прижимающих усилиях 10, 100 Н. При прижимающих усилиях 300 Н (рис. 4, в) поле давления нестационарно, что свидетельствует о развитии повреждений на глубине свыше 1 мм с последующим разрушением пластины. Точки 1 и 3 находятся на концах обрабатываемой поверхности пластины. Точка 2 находится на расстоянии  $z = b/4$  от конца пластины.

С увеличением прижимающего усилия возрастает время формирования квазистационарного поля давления. В результате действия на обрабатываемой кромке клинообразной пластины прижимающих усилий в объеме пластины возникают локальные зоны действия растягивающих напряжений. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при величине прижимающих усилий до 300 Н, возникающие напряжения в рассмотренных пластинах существенно меньше предела прочности твердого сплава «ВолКар» на растяжение ( $\sim 50$  МПа при  $1150^\circ\text{C}$ ).

На рис. 4, а, б показаны изменения во времени расчетных значений интенсивности сдвиговых напряжений в точках 1, 2, 3, а также формирующееся квазистационарное поле этого параметра при скорости сдвига  $V = 45$  м/с, температуре  $1000$  °С и прижимающих усилиях 10 и 100 Н. При прижимающих усилиях 300 Н (рис. 4, в) поле интенсивности сдвиговых напряжений нестационарно, что свидетельствует о развитии повреждений на глубине свыше 1 мм с последующим разрушением пластины.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зоне режущей кромки пластины у поверхности шлифования сдвиговые напряжения достаточны для развития неупругих деформаций. Развитие неупругих деформаций приводит к релаксации сдвиговых напряжений и обуславливает осциллирующий характер их изменения (см. рис. 4). С удалением от поверхности режущей кромки на величину, превышающую вдвое толщину удаляемого материала, напряжения постепенно уменьшаются и не представляют опасности с точки зрения развития неупругих деформаций и повреждений материала.

На рис. 5, а и б показано квазистационарное поле параметра поврежденности, формирующееся при скорости сдвига  $V = 45$  м/с,  $T = 1000$  °С и прижимающих усилиях 10 и 100 Н. При прижимающих усилиях 300 Н в пластине происходит интенсивное развитие повреждений на глубине свыше 1 мм (рис. 5, в).

При величине прижимающих усилий до 100 Н повреждения материала режущей кромки под поверхностью шлифования не наблюдается. С увеличением усилия более 100 Н и скоростях, превышающих 33 м/с, наблюдается разрушение режущей кромки с вырывами отдельных блоков твердого сплава на протяжении всей длины лезвия. Непосредственно под поверхностью контактной зоны, в объеме затачиваемой пластины формируется область поврежденного материала. Опасными, с точки зрения интенсивного развития микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах, находящихся вблизи области обработки, являются режимы шлифования со следующими комбинациями скорости шлифования - прижимающего усилия: 15 м/с - 300 Н, 33 м/с - 100 Н, 33 м/с - 300 Н, 45 м/с - 300 Н. Стоит также отметить, что режимы, при которых в процессе обработки на затачиваемой кромке наблюдались зоны отрицательного давления, являются неблагоприятными с точки зрения качества обработанной поверхности (15 м/с - 10 Н, 33 м/с - 10 Н).

Результаты моделирования процесса шлифования пластины из сплава «ВолКар» при линейной скорости  $\sim 45$  м/с и прижимающем усилии 300 Н свидетельствуют о возможности образования повреждений в объеме пластины на глубине свыше 1 мм под обрабатываемой поверхностью.

С увеличением времени процесса низкоскоростного шлифования может возрастать температура в зоне обработки.

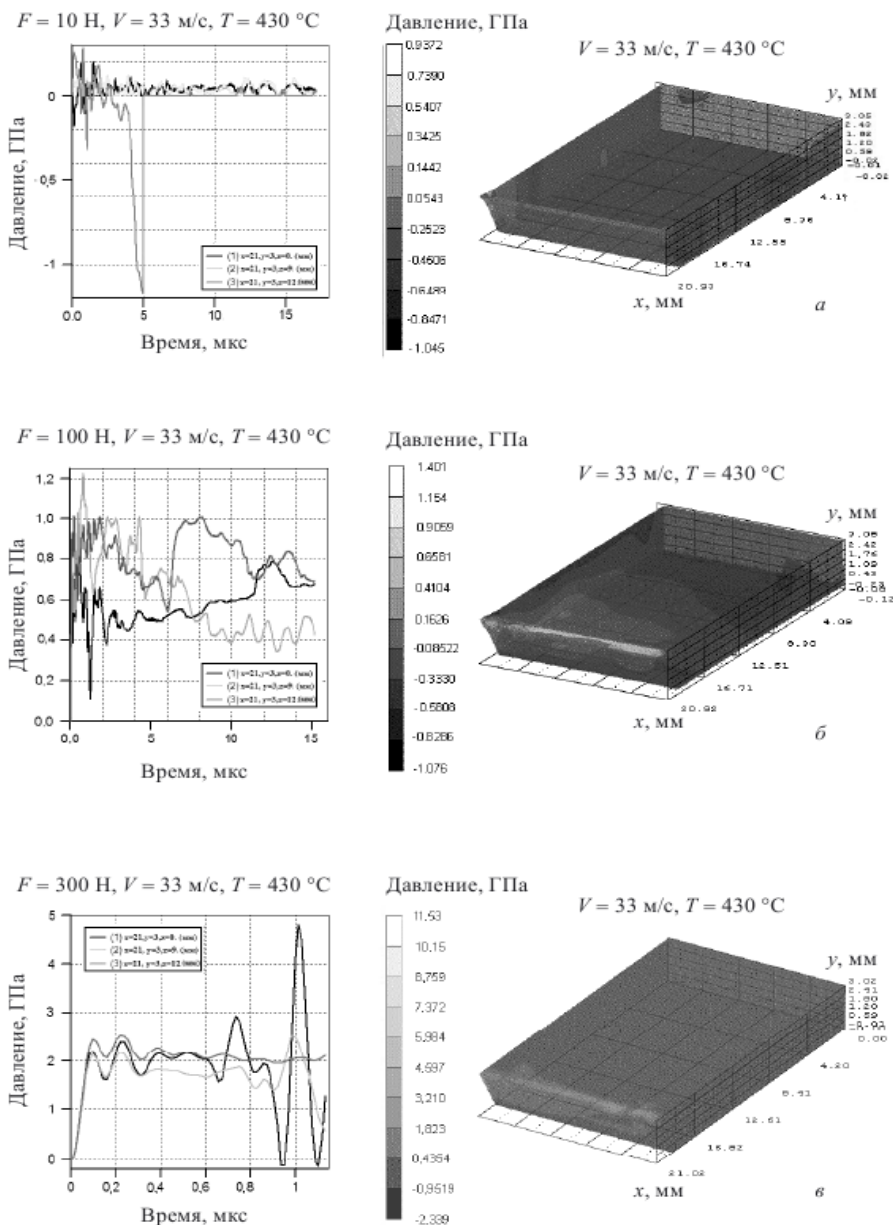


Рисунок 3 – Расчетные значения давления

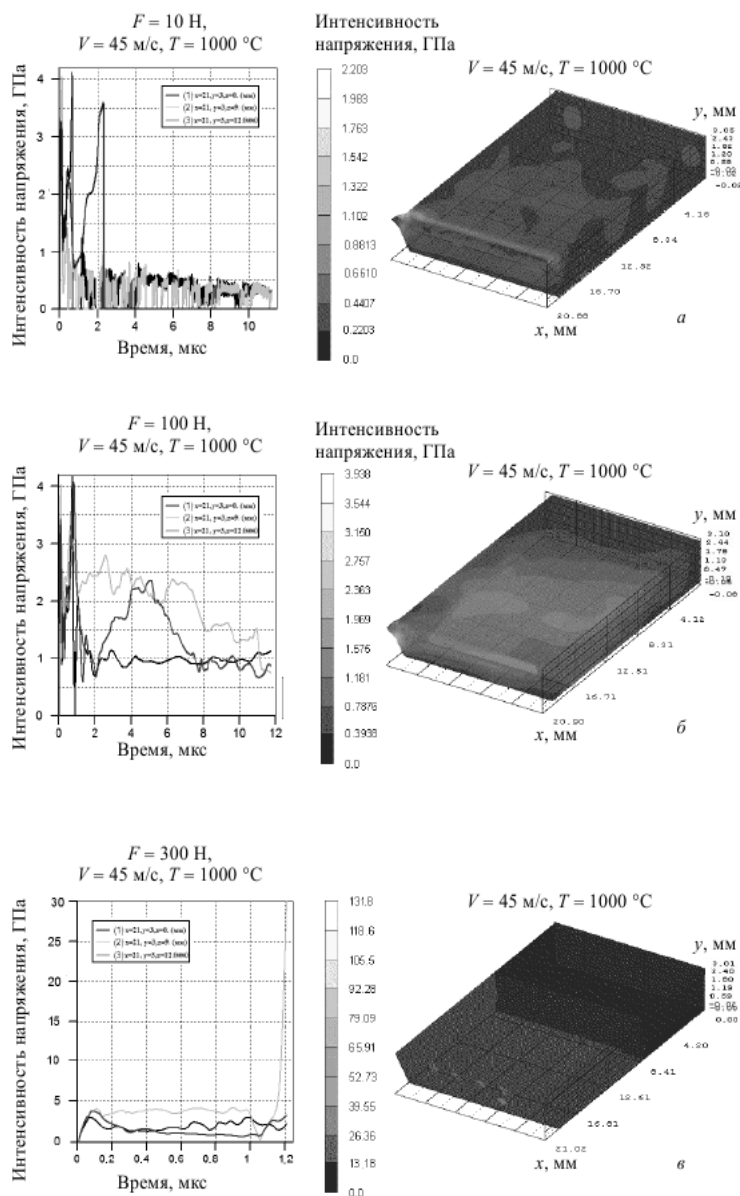


Рисунок 4 – Расчетные значения интенсивности напряжений

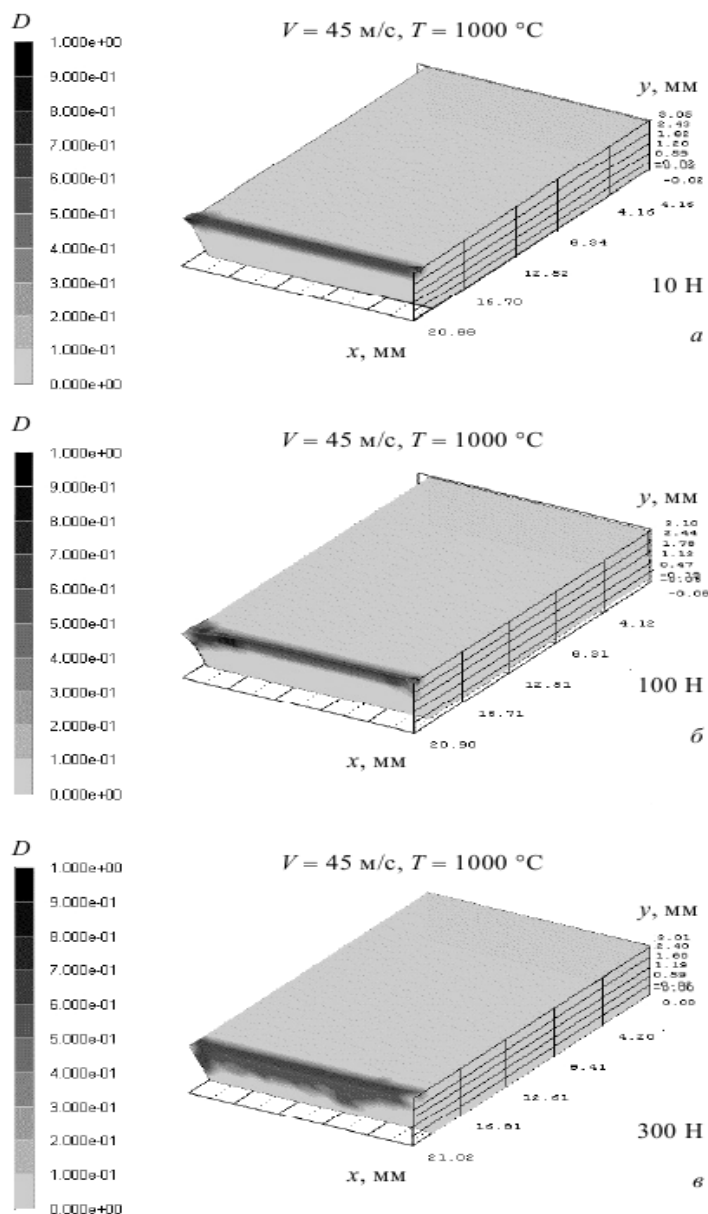


Рисунок 5 – Расчетные значения параметра поврежденности



Анализ полученных данных о распределении параметра поврежденности в обрабатываемой пластине свидетельствует о том, что при температуре  $T = 1000$  °С критические условия для возникновения микроповреждений в приповерхностных слоях возникают при более низких силах резания, чем при температуре  $T = 430$  °С.

Результаты моделирования процессов деформации и повреждения твердого сплава «ВолКар» при шлифовании согласуются с результатами экспериментальных исследований сил резания при различных методах алмазного шлифования твердого сплава [2]. Было установлено, что традиционное алмазное затачивание твердого сплава «ВолКар» без применения электрических процессов осуществляется при усилиях до 200 Н. Алмазное затачивание с непрерывной электрической правкой поверхности алмазного круга может быть реализовано при усилиях до 80 Н.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что уменьшение прижимающих усилий в диапазоне от 200 до 50 Н способствует уменьшению поврежденности твердого сплава «ВолКар» в зоне режущей кромки.

### **Выводы**

Полученные результаты обосновывают возможность повышения качества заточки твердосплавных режущих элементов с применением комбинированных методов электроалмазного шлифования. Предложена физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения квазихрупких инструментальных материалов высокой твердости при шлифовании алмазным кругом, позволяющая проводить оценку повреждений и напряженно-деформированного состояния при задан заданных режимах шлифования.

С использованием модели проведено исследование процессов деформации пластин из твердого сплава «ВолКар» со специфической конфигурацией при алмазном шлифовании с линейной скоростью сдвига от 15 до 45 м/с, прижимающих усилиях 10, 100 и 300 Н и температурах от 430 до 1000 °С.

Показано, что для затачивания алмазным кругом режущих элементов из инструментальных материалов, имеющих специфические геометрию и габаритные размеры, присущие для инструмента, обрабатывающего конструкционные материалы, рекомендуется добиваться линейных скоростей на контактирующих поверхностях в пределах от 33 до 45 м/с.

Для достижения удовлетворительного качества подготовленных режущих поверхностей и лезвия инструмента из исследованных твердых сплавов необходимо использовать условия обработки, гарантирующие усилия шлифования, не превышающие 100 Н.

Модель может быть адаптирована и для других марок квазихрупких высокопрочных инструментальных материалов. Таким образом, появляется

возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях алмазного инструмента и обрабатываемых конструкционных материалов.

**Список использованных источников литературы** 1. *Malkin S., Hwang T.W.* Grinding Mechanisms for Ceramics. // CIR. Annals - Manufacturing Technology. 1996. V. 45. P. 569-580. 2. *Янюшкин А.С., Шоркин В.С.* Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с. 3. *Лобанов Д.В., Янюшкин А. С.* Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов. Братск: Брат. ун-т, 2011. 192 с. 4. *Doman D., Warkentin A., Bauer R.* Finite element modeling approaches in grinding // Int. J. Machine Tools and Manufacture. 2009. V. 49. P. 109-116. 5. *Aurich J., Kirsch B.* Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains // CIRP J. Manufacturing Science and Technology. 2012. V. 5. P. 164-174. 6. *Hamdi H., Zahouani H., Bergheau J.* Residual stresses computation in grinding process // J. Materials Proc. Technology. 2004. V. 147. P. 277-285. 7. *Johnson G.R., Holmquist T.J.* An improved computational constitutive model for brittle materials // High Pressure Science and Technology - 1993. New York, 1994.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Malkin S., Hwang T.W.* Grinding Mechanisms for Ceramics. // CIR. Annals - Manufacturing Technology. 1996. V. 45. P. 569-580. 2. *Janjushkin A.S., Shorkin V.S.* Kontaktnye processy pri jelektroalmaznom shlifovanii. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 230 s. 3. *Lobanov D.V., Janjushkin A. S.* Podgotovka rezhushhego instrumenta dlja obrabotki kompozitsionnyh materialov. Bratsk: Brat. un-t, 2011. 192 s. 4. *Doman D., Warkentin A., Bauer R.* Finite element modeling approaches in grinding // Int. J. Machine Tools and Manufacture. 2009. V. 49. P. 109-116. 5. *Aurich J., Kirsch B.* Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains // CIRP J. Manufacturing Science and Technology. 2012. V. 5. P. 164-174. 6. *Hamdi H., Zahouani H., Bergheau J.* Residual stresses computation in grinding process // J. Materials Proc. Technology. 2004. V. 147. P. 277-285. 7. *Johnson G.R., Holmquist T.J.* An improved computational constitutive model for brittle materials // High Pressure Science and Technology - 1993. New York, 1994